

# 複断面水路密度流における狭窄部の影響について

藤原 広和\* ・ 成田 好亮\*\* ・ 沢本 正樹\*\*\*  
石川 忠晴\*\*\*\* ・ 田中 博通\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

流体の混合現象は水系に限れば、塩水の遡上、温排水、水質汚濁、湖の淡水化等、多くの水理環境問題、生態環境に影響を及ぼし、これらの対策・計画上、混合過程、混合量等を適切に評価することは非常に重要である。塩水遡上は河口部の利水、生態環境を考える上で極めて重要である。河口域周辺の密度流は混合型の河口密度流、塩水楔、密度噴流型の問題として研究されている(玉井, 1980)。

河口部における流れは、様々な因子によって支配され、その河口の特徴によって複雑な流動形態がみられる。青森県東南部に位置する高瀬川河口部は、汽水湖である小川原湖と太平洋を結ぶ感潮河川であるが、複断面河道に起因する複雑な流動混合が生じると指摘されている(藤原ら, 1995)。また、複断面水路における一様密度の流れについては多くの研究がある(例えば、今本ら, 1992)が、そこでの密度流に関したものは、ほとんど見られない。著者らは、感潮河川である青森県高瀬川河口部における現地観測結果(藤原・田中, 1993)などから、複断面河道に起因する複雑な流動形態が生じていることに着目し、実験的に複断面水路密度流の水理特性などを明らかにしてきた(藤原ら, 1995; 1997)。しかし、実際の河道地形は複雑である。本研究では高瀬川河口部に存在する狭窄部に着目し、高瀬川をモデルとした狭窄部の存在する水路模型を作成し、その混合過程、特性を流速、塩分の測定、可視化手法等によって実験的に明らかにしようとしたものであり、本実験結果(複断面+密度流+狭窄部)と過去の狭窄部のない複断面水路密度流の実験結果(複断面+密度流)(藤原ら, 1995)と比較したものである。

図-1は青森県東南部に位置する高瀬川河口部の概要図である。高瀬川河口部は、汽水湖である小川原湖と太平洋を結ぶ感潮河川である。高瀬川は流域面積 866.9

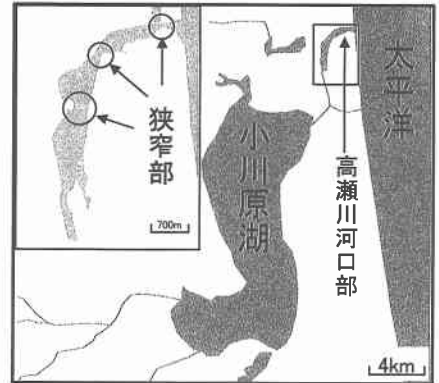


図-1 小川原湖と高瀬川河口部

km<sup>2</sup>、幹線流路延長 63.7 km で、八甲田山系八幡岳に源を発する 1 級河川である。小川原湖は湖面積 63.2 km<sup>2</sup>、平均水深 11 m である。河口より 5.7 km 上流に放水路があるが、洪水時以外はゲートが閉められているので、海水は通常高瀬川を経由し、侵入する。

## 2. 実験装置および実験方法

高瀬川河口部の河床縦横断面測量図(建設省高瀬川工事事務所)を参考にし、図-2の様な実験水路を作成した。塩水槽(太平洋)と淡水槽(小川原湖)を高瀬川(感潮河川)をモデルとした複断面水路で結んだ。水路にはアクリル板で狭窄部を図-2(b), (c), (d)のように設置した。塩水槽端ゲート位置から流下方向に  $x$ 、水路中央から水路幅方向に  $y$  とする。塩水と淡水の境界に位置するゲートを開ける速度を調節することにより擬似的に満潮移行時の潮汐を与える(藤原ら, 1995)。淡水には水道水、塩水は水道水に食塩を溶かしたのを用い、塩淡水の相対密度差を 0.002 に調節して使用した。塩分濃度の測定には導電率計(KENEK MK-203, MKTS-50-04)を使用した。塩分濃度の測定位置は縦断方向に  $x=365$  cm 断面で、横断面測定位置は図-2(e)の No.1~No.8 である。表面流速の測定位置は縦断方向に  $x=365$  cm 断面で、横断面測定位置は図-2(e)の No.2~No.8 の水面である。表面流速はパンチクズを用いて  $x$  方向の流速をビデオカ

\* 正会員 八戸高専助教授 建設環境工学科  
\*\* 学生会員 岩手大学 農学部  
\*\*\* フェロー 工博 東北大学大学院教授 工学研究科  
\*\*\*\* フェロー 工博 東京工業大学大学院教授  
\*\*\*\*\* 正会員 工博 東海大学教授 海洋学部

メラで撮影し求めた。可視化は塩水に蛍光染料のウランを混入し、 $x=170\text{ cm}$  (上流側) と  $x=315\text{ cm}$  (下流側) を中心とした2ヵ所でビデオカメラで撮影した。

実験条件は高瀬川工事事務所で測定した河口、高瀬川、小川原湖の各観測所の水位、流速、Cl<sup>-</sup>濃度のデータから、緩混合的な場合と強混合的な場合について表-1のよう

表-1 実験条件

ケース	水位 (cm)		水位差 $\Delta h$ (cm)	相対密度差 $\Delta\rho/\rho_2$	ゲート操作時間 (sec) $\Delta T$	水路断面形状
	淡水槽 $h_1$	塩水槽 $h_2$				
CASE 1	4.88	5.15	0.27	0.002	167	複断面
CASE 2	4.80	5.26	0.46	0.002	216	狭窄部なし
CASE 3	4.88	5.15	0.27	0.002	167	複断面
CASE 4	4.80	5.26	0.46	0.002	216	狭窄部あり

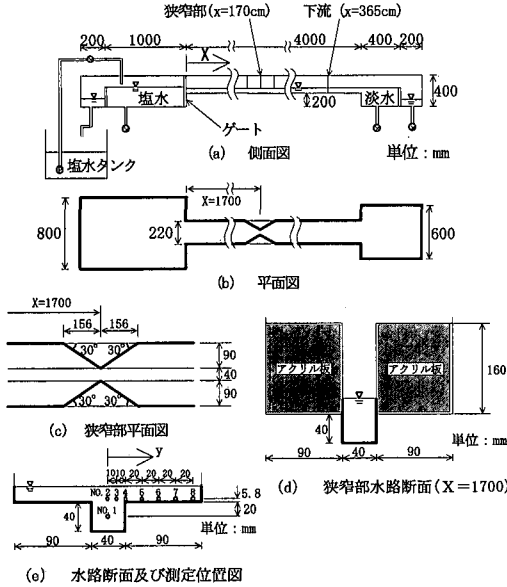


図-2 実験水路の概略図

に設定した (藤原ら, 1997)。CASE 1 と CASE 2 は複断面水路に狭窄部が存在しない場合で、CASE 3 と CASE 4 は複断面水路に狭窄部が存在する場合である。また、CASE 1 と CASE 3 は緩混合的 (塩淡水位差小) な場合、CASE 2 と CASE 4 は強混合的 (塩淡水位差大) な場合である。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 流速および Cl<sup>-</sup>濃度比の時系列について

図-3 は、測定された表面流速および Cl<sup>-</sup>濃度比 (塩水槽の初期濃度を 1 としている) の時系列である。図-3 上側の CASE 1 と CASE 2 は狭窄部がない複断面水路の結果であり、下側の CASE 3 と CASE 4 は狭窄部がある場合の結果である。また、図の左側の CASE 1 と CASE 3 は塩淡水位差小の場合であり、右側の CASE 2 と CASE 4 は塩淡水位差大の場合である。流速値は水路中央では大きく、水路側壁に近づくに従い小さくなる。CASE 1 と

CASE 3 および CASE 2 と CASE 4 を比較すると流速値は全体的に狭窄部がある場合の方が小さい傾向がある。Cl<sup>-</sup>濃度比は No. 2~No. 6 では変動が大きくなる傾向がある。CASE 1 と CASE 3 では No. 2~No. 4 の変動が大きい。低水路部と高水敷部の濃度変化の時間差は No. 2 と No. 6 の差で比較すると CASE 3 が短くなっている。また、低水路部の下層と上層の時間差 (No. 1 と No. 2 の差) では CASE 3 が時間は長くなる。CASE 2 と CASE 4 では、CASE 2 は No. 2~No. 4 の変動が大きく、CASE 4 は No. 2~No. 6 で変動が大きい。低水路部と高水敷部の時間

#### 塩淡水位差小

#### 塩淡水位差大

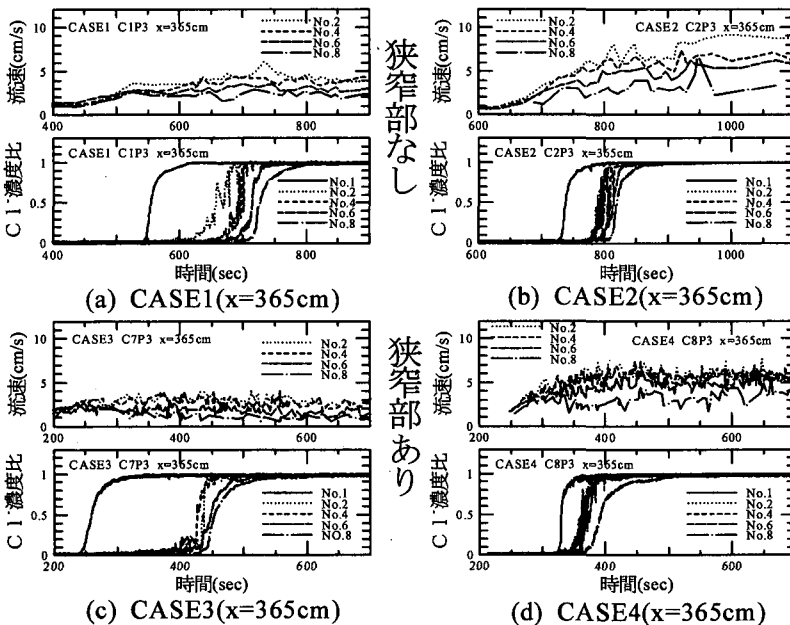


図-3 流速および Cl<sup>-</sup>濃度比の時系列

差は No.2 と No.6 の差では CASE 4 が短くなっている。No.1 と No.2 の差では時間は CASE 4 が短い。各測点の流速差によるものと考えられる。また、狭窄部があると No.8 (側壁近く) では濃度変化時間が長くなる。

(2) 表面流速分布の比較

図-4 は塩分濃度変化時の  $x=365\text{ cm}$  における  $y$  方向の表面流速の分布、図-5 は濃度変化時の  $x=365\text{ cm}$  における表面流速勾配の分布である。図-4 より、狭窄部が存在する場合の表面流速は、狭窄部が存在しない場合より全体的に小さい。また、表面流速は水路中央で大きく、側壁に近づくにつれ徐々に小さくなる。各 CASE の表面流速の平均値を比べてみても CASE 1 は  $3.52\text{ cm/s}$ 、CASE 2 は  $5.11\text{ cm/s}$ 、CASE 3 は  $2.42\text{ cm/s}$ 、CASE 4 は  $4.64\text{ cm/s}$  となり、狭窄部の影響によって表面流速が小さくなっている。図-5 より、流速勾配は低水路から高水敷の境界部で大きくなる傾向を示している。また、CASE 1, 2 では  $y=6\text{ cm}$  の所で小さく、 $y=9\text{ cm}$  壁面付近で大きくなる傾向がある。CASE 3 は高水敷上でほぼ一定の勾配となった。CASE 4 は高水敷上で  $y=6\text{ cm}$  の所で大きく、 $y=9\text{ cm}$  壁面付近で小さくなった。狭窄部によって生じた渦が下流部の流速勾配に影響を与えていることがわかる。CASE 3 では高水敷上の流速勾配はほぼ一定となっている。CASE 4 では高水敷中央部で大きくなり、側壁近くで小さくなる。各 CASE の流速勾配の平

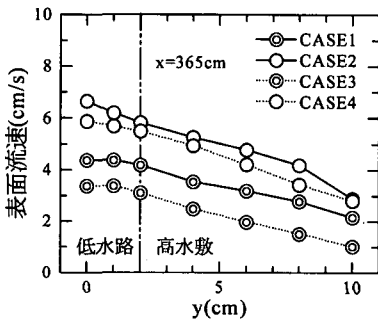


図-4 表面流速分布 ( $x=365\text{ cm}$ )

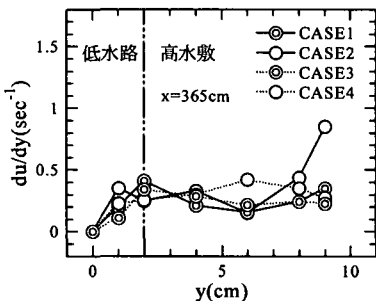


図-5 流速勾配分布 ( $x=365\text{ cm}$ )

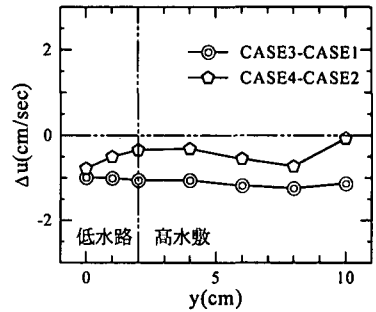


図-6 流速差の分布

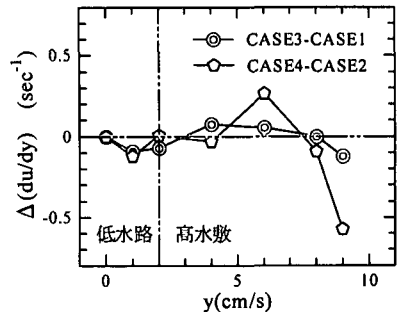


図-7 流速勾配差の分布

均値は CASE 1 で  $0.225\text{ s}^{-1}$ 、CASE 2 で  $0.339\text{ s}^{-1}$ 、CASE 3 で  $0.204\text{ s}^{-1}$ 、CASE 4 で  $0.261\text{ s}^{-1}$  となり、狭窄部の影響により流速勾配の平均値が小さくなっている。塩淡水位差が大きい方が流速勾配に大きな変化が生じることが分かる。図-6 は表面流速の差の分布である。図-7 は流速勾配の差の分布である。ここでは、狭窄部がある・なしの差を見るため対応する CASE の差で表している。つまり CASE 1 と CASE 3 の差、CASE 2 と CASE 4 の差である。図-6 より、狭窄部を設けた場合 (CASE 3, 4) の方が、設けない場合 (CASE 1, 2) より表面流速が小さいことがわかる。これは、狭窄部による損失のためである。図-7 より、低水路部では差は少ない。CASE 1, 2 では高水敷中央部で小さくなり、側壁近くで大きくなる傾向がある。狭窄部を設けた場合、塩淡水位差が大きくなるにつれて流速勾配は高水敷中央部で大きく、側壁近くで小さくなっていく傾向がみられる。

(3) 混合スケールについて

密度フロント部のぼやけの長さを混合の尺度として考える。塩素イオン濃度比が  $0.05\sim 0.90$  に変化する時間と濃度変化時の表面流速との積をフロント長さとし、その分布を図-8 に示す。フロント長さは  $y=2\text{ cm}$  の所で大きく、 $y=6\text{ cm}$ 、CASE 4 を除いた  $y=10\text{ cm}$  のところで、小さくなる傾向がある。CASE 4 の壁面近くを除けば、高水敷上では、フロント長さに大きな変化はない。全体的

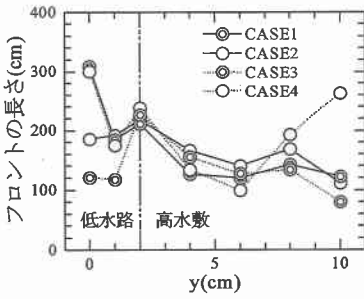


図-8 フロント長さの分布

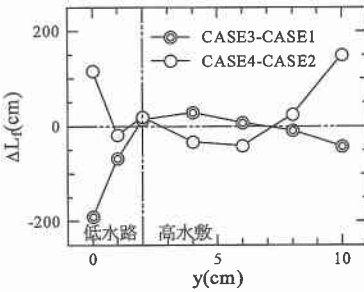


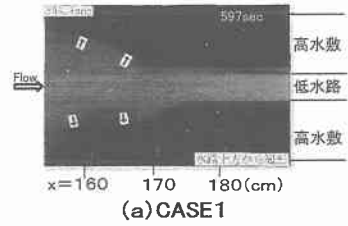
図-9 フロント長さの差の分布

にフロント長さは低水路と高水敷の境界部で大きく高水敷中央部で小さくなる傾向がある。また、側壁付近ではCASE 1, 2, 3は小さくなっているのに対し、CASE 4は大きくなっている。高水敷上のフロント長さの平均値を比較するとCASE 1は144.6 cm、CASE 2は161.1 cm、CASE 3は144.5 cm、CASE 4は185.2 cmとなり、塩淡水位差が大きいときに狭窄部を設けることにより高水敷上のフロント長さは大きくなる。水路断面全体のフロント長さの断面平均値はCASE 1で173.9 cm、CASE 2で169.0 cm、CASE 3で137.1 cm、CASE 4で200.3 cmとなった。狭窄部を設けない場合、塩淡水位差の大小によりフロント長さに差はほとんどないが、狭窄部を設けた場合、水位差の大小によりフロント長さに差が生じる。

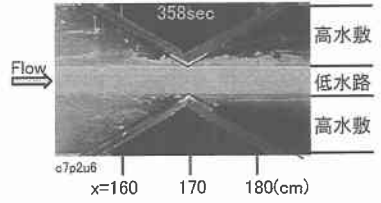
図-9は、CASE 1とCASE 3およびCASE 2とCASE 4におけるフロント長さの差の分布を表している。狭窄部の存在は低水路部と側壁近くの混合に影響を与えていることがわかる。

(4) 可視化による混合過程の比較

写真-1はCASE 1とCASE 3(塩淡水位差小)の上流部の混合過程を比較したものである(上方より撮影)。CASE 1では複断面の効果により水平方向に混合している。CASE 3では狭窄部で塩水の通過断面を狭められるが、狭窄部通過後徐々に水平方向に広がっている様子が確認できる。写真-2はCASE 2とCASE 4(塩淡水位差大)の上流部の混合過程を比較したものである。CASE 2

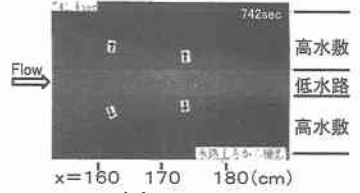


(a) CASE 1

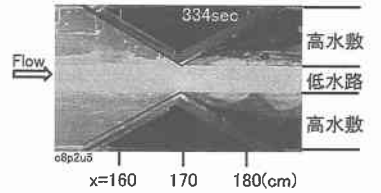


(b) CASE 3

写真-1 上流部混合過程 (CASE 1とCASE 3)



(a) CASE 2

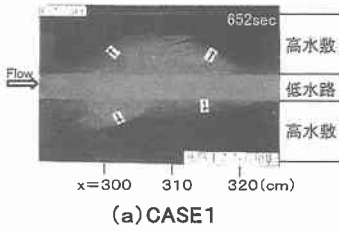


(b) CASE 4

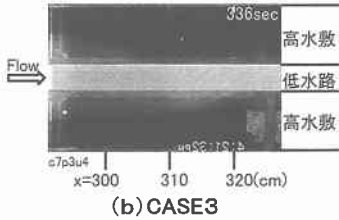
写真-2 上流部混合過程 (CASE 2とCASE 4)

では複断面の効果により水平方向に混合している。これはCASE 1と同様である。CASE 4では狭窄部通過後、渦が発生していることが確認できる。これは狭窄部の影響である。塩淡水位差小の場合のCASE 3ではみられなかった現象である。

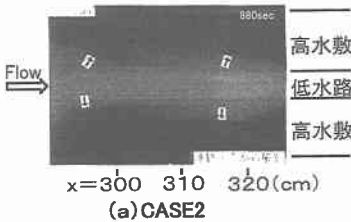
写真-3はCASE 1とCASE 3(塩淡水位差小)の下流部の混合過程を水路上方より撮影したものである。写真-4はCASE 2とCASE 4(塩淡水位差大)の下流部の混合過程を水路上方より撮影したものである。下流部では複断面の効果により塩水が混合される。前述(3)で比較したように塩淡水位差が大きい場合は狭窄部を設けることにより(CASE 4)上流部で複断面の効果と狭窄部の効果が複合し、下流に進むに従い高水敷上のフロント長さは狭窄部がない場合(CASE 2)と比較すると長くな



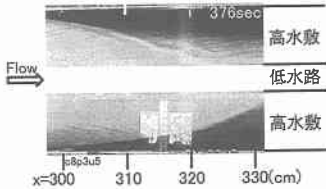
(a) CASE 1



(b) CASE 3

写真-3 下流部混合過程  
(CASE 1とCASE 3)

(a) CASE 2



(b) CASE 4

写真-4 下流部混合過程  
(CASE 2とCASE 4)

り混合はより促進されているといえる。また、塩淡水位差小で狭窄部が存在する CASE 3 は狭窄部のない CASE 1 より混合が促進されているとはいえない。これは前述のフロント長さの比較からも確認できる。

図-10 は複断面水路の高水敷に狭窄部がない場合とある場合の流れの模式図である。狭窄部のない場合はこれまでの研究 (藤原ら, 1995) により、低水路部の内部波と高水敷上の shear により混合が促進されることがわ

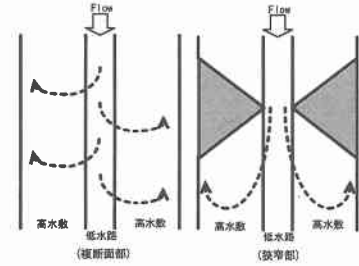


図-10 混合過程の模式図

かっている。狭窄部がある場合はこの狭窄部がない場合の効果と狭窄部通過後に発生する渦が複合して下流へ混合しながら進む。ただし、これは塩淡水位差大のときにみられる現象である。塩淡水位差小の場合、狭窄部通過後に渦が発生せず、複断面の効果だけで混合する。

#### 4. おわりに

本研究の主な知見は次の通りである。

(1) 塩淡水位差小の場合、CASE 1 と CASE 3 のフロント長さの比較により、狭窄部のない複断面水路と狭窄部の存在する複断面水路とは混合量に差はない。つまり、複断面水路であることの効果が大きい。

(2) 塩淡水位差大の場合、CASE 2 と CASE 4 の比較により、複断面水路の効果と狭窄部通過後に生じる渦の効果により混合が促進されるので、混合量は狭窄部のない場合に比べて大きくなる。

本研究を行うにあたり建設省東北地方建設局高瀬川総合開発工事事務所には貴重なデータを提供して頂き感謝いたします。また、本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究 (B) (研究代表者 石川忠晴) による研究の一部であることを付記し、謝意を表します。

#### 参考文献

- 今本博健・石垣泰輔・武藤裕則 (1992): 複断面水路流れにおける低水路流れと高水敷上流れの混合機構に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 36 巻, pp. 139-144.
- 玉井信行 (1980): 新体系土木工学 22 密度流の水利, 技報堂出版, 260 p.
- 藤原広和・田中博通 (1993): 高瀬川感潮域の現地観測による水理特性について, 水工学論文集, 第 37 巻, pp. 171-176.
- 藤原広和・沢本正樹・神山尚人 (1995): 複断面水路における河口密度流の混合特性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 416-420.
- 藤原広和・沢本正樹・田中博通 (1997): 複断面および単断面水路における密度流の混合特性の相違について, 水工学論文集, 第 41 巻, pp. 515-520.